

· 综合 ·



艏部冰犁对耙吸挖泥船冰载荷的影响研究

田俊峰¹, 王康帅¹, 薛坚², 刘仁伟¹, 张润喜³

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212100;

2. 江苏现代造船技术有限公司, 江苏 镇江 212003; 3. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461)

摘要: 为提高耙吸挖泥船在冰区航行与作业时的结构安全性和抗冰性能, 针对船首在碎冰撞击下易受损的问题, 建立了冰-船相互作用的有限元数值模拟模型。研究基于元胞自动机技术构建符合幂函数分布特征的碎冰场数字模型, 并采用 S-ALE 算法耦合船体、碎冰与水域的相互作用过程。通过 LS-DYNA 平台计算不同冰犁厚度对船首受力特性的影响, 分析了冰犁结构在分散冰载荷、降低碰撞应力方面的作用规律。结果表明: 加装冰犁后, 船首最大碰撞应力可由 308 MPa 降低至 206 MPa, 应力峰值下降 33.1%, 满足 ICE3 冰级航行安全要求, 有效避免了结构屈服。研究揭示了冰犁厚度与抗冰性能的定量关系, 提出了可工程应用的船首结构加强设计方案, 为冰区挖泥船抗冰安全设计与冰级改造提供理论依据和技术支撑。

关键词: 冰载荷; 耙吸挖泥船; 冰级加强; 冰犁; 数值模拟

中图分类号: U663

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0011-09

Effect of bow ice plow on ice load acting on trailing suction hopper dredger

TIAN Junfeng¹, WANG Kangshuai¹, XUE Jian², LIU Renwei¹, ZHANG Runxi³

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;

2. Jiangsu Modern Shipbuilding Technology Co., Ltd., Zhenjiang 212003, China;

3. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: To improve the structural safety and ice-resistance performance of trailing suction hopper dredgers during navigation and operation in ice-covered waters, a finite element numerical model of ice-ship interaction is established to address the problem of bow damage under fragmented ice impact. Based on the cellular automata technique, a digital model of fragmented ice field that conforms to the power function distribution characteristics is constructed, and the S-ALE algorithm is employed to simulate the coupled interaction among the ship hull, fragmented ice, and surrounding water. Using the LS-DYNA platform, the effects of different ice plow thicknesses on the stress characteristics of the bow are calculated to investigate the role of the ice plow structure in dispersing ice loads and reducing collision stress. The results show that after installing an ice plow, the maximum collision stress at the bow of the ship can be reduced from 308 MPa to 206 MPa, and the peak stress can be reduced by 33.1%, meeting the safety requirements of ICE3 ice-class navigation and effectively avoiding structural yielding. The study quantitatively reveals the relationship between ice plow thickness and ice-resistance performance, and proposes an engineering applicable design scheme for strengthening the bow structure. This provides theoretical basis and technical guidance for the ice-resistance safety design and ice-class retrofitting of dredgers operating in ice regions.

Keywords: ice load; trailing suction hopper dredger; ice-class structural strengthen; ice plow; numerical simulation

随着我国港口建设与海洋工程的快速发展, 耙吸式挖泥船在航道疏浚、港池清理和吹填造地

等工程中应用广泛。为延长施工周期并提升利用率, 部分挖泥船开始在我国北方季节性结冰海域

收稿日期: 2025-07-30 录用日期: 2025-10-29

作者简介: 田俊峰(1963—), 男, 二级教授, 从事船舶海洋工程专业。

(如渤海湾、辽东湾、北黄海等)进行冬季作业。然而,在轻冰区航行时,碎冰或薄冰对船首底板和舵部的周期性撞击容易引起局部应力集中、焊缝疲劳或推进受损,影响船舶的结构安全与作业稳定性。因此,研究耙吸式挖泥船在轻冰区的抗冰性能及其结构优化设计,具有重要的工程意义。

目前,国内外关于船舶抗冰结构和船-冰相互作用的研究较为成熟。芬兰、加拿大和俄罗斯等寒区国家较早开展了相关试验与数值研究。Lubbad 等^[1]建立了船-冰碰撞有限元模型,并分析了冰破碎能量分布;Jordaan^[2]总结了北极船舶的冰载荷经验公式;Daley^[3]指出合理的冰犁几何形状可使船首局部应力降低 25%以上;Jenssen 等^[4]进一步发展了冰-船碰撞能量分布模型。国内学者刘东等^[5]、徐张等^[6]分别研究了冰-船相互作用的数值模拟方法与局部结构响应特征,指出适当的局部加强能有效降低船首应力水平。相关成果为抗冰研究奠定了基础,但是针对 ICE3 等级轻冰船舶(典型冰厚 ≤ 10 cm)的结构设计研究仍相对有限,尤其是耙吸式挖泥船在轻冰区作业下的抗冰设计问题,尚缺乏系统分析。

在国际工程实践中,俄罗斯船舶普遍采用贯穿整个船首纵剖面的冰刀或冰犁结构,防护范围较广,但同时增加了船体质量和建造复杂度。考虑到耙吸式挖泥船在空载与满载工况下吃水均超过球鼻艏,其与海冰接触的范围主要集中于吃水带附近。基于此,本文提出了一种局部加装式冰犁结构:冰犁安装范围上至船首平面、下至球鼻艏上端,仅覆盖实际可能与海冰接触的区域。该设计既能满足轻冰区抗冰要求,又可以有效降低冰犁自重力,减少对装载量和稳性的影响。同时,冰犁采用模块化焊接连接方式,可在船坞中快速加装或替换,便于不同冰级需求下的灵活加强,具有良好的可维护性与工程可行性。

基于上述问题与需求,本文以典型 ICE3 冰区

航行条件为研究背景^[7],建立基于元胞自动机碎冰建模与 S-ALE 耦合方法的冰-船相互作用数值模型,系统分析了不同冰犁厚度对耙吸式挖泥船首部结构应力分布及抗冰性能的影响规律,提出轻冰区挖泥船的最优冰犁结构设计方案。研究成果可为 ICE3 级船舶的结构优化、抗冰设计及施工改造提供理论依据和技术参考。

1 船冰作用数值模型

1.1 基于元胞自动机的碎冰模型

元胞自动机是一种具有离散时间步和离散空间的动力学系统,它由一组规则排布在元胞空间上的元胞组成。每个元胞具备多种可能状态,并能根据自身以及邻近单位的前一状态,依特定的变化规则进行状态更新。这赋予了元胞自动机模拟复杂系统空间时间演进的能力。构建元胞自动机并非有固定的数学公式可循,其构造方法复杂且分类困难。通常来说,元胞自动机可以分为 4 种类型:平稳型、周期型、混沌型和复杂型。这些类型展现了元胞自动机在时间维度上的行为特征。作为一种时间和空间均为离散的动态系统,元胞自动机表现出的独特性质是其在空间中的随机分布。这意味着元胞自动机的状态在空间上呈现出不规则的分布,类似于碎裂的冰块形状。这种特性使元胞自动机能够模拟和研究各种复杂的现象和系统^[8]。

本节基于元胞自动机构建碎冰模型^[9],主要步骤如下。

1.1.1 VB 脚本法构建元胞点

在该流程中,首先定义了元胞的状态量,根据具体问题的需求,可以设置不同的状态;然后,将每个元胞在离散的时间步上根据其自身及邻居的状态进行更新,遵循蚂蚁规则,利用横纵坐标表示位置,利用 0、1 表示网格颜色,将问题数值逻辑化。通过 VB 脚本,可以方便地实现这一更新过程,并对元胞的状态进行记录和可视化。使

用 VB 脚本构建元胞自动机的方法相对简单且高效, 能够减少计算时间并得到准确的结果。因此, 本文选择了此方法来构建元胞自动机。构建流程见图 1。

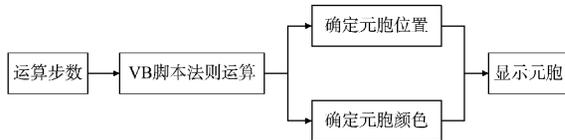


图 1 VB 脚本法构建元胞自动机流程
Fig. 1 Flow for constructing cellular automata using VB Script method

利用犀牛软件中的 Grasshopper 插件得到 VB 脚本法构建元胞自动机的电池组流程见图 2。

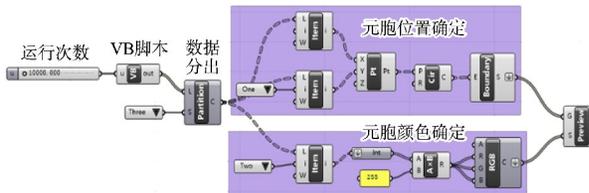


图 2 VB 脚本法构建元胞自动机的电池组流程
Fig. 2 Flow for constructing a battery pack for cellular automata using VB Script method

为了防止元胞多次执行导致混乱, 可以优化 VB 脚本。可行的办法是在初始状态下加入若干已确定的元胞点, 从而打破逃逸规则, 避免可能发生的逃逸现象。这些特定元胞点应该遵循图 3 所示的分布模式。

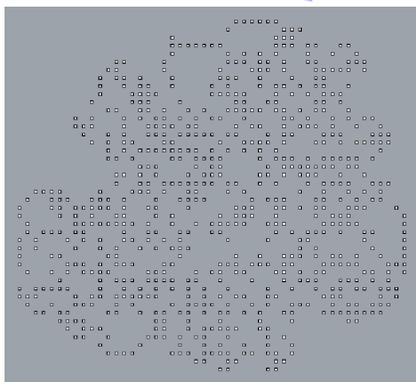


图 3 使用 VB 脚本法生成元胞点分布图
Fig. 3 Generating a cellular point distribution map using VB Script method

1.1.2 利用泰森多边形建立碎冰分布模型

泰森多边形是一种几何随机划分方法, 通过连接相邻点的垂直平分线来构建连续的多边形。本节将利用泰森多边形对由元胞自动机生成的随机点进行建模, 以模拟碎冰模型。

考虑到生成的元胞点数量较多且分布密集, 会对二维碎冰的划分产生影响。因此, 在生成元胞点后, 需要引入随机减少运算器, 以获得适量且合理分散的点, 为二维碎冰划分做好准备。然后, 利用泰森多边形理论进行划分, 并引入缩放因子, 对划分的图形进行缩放, 得到二维碎冰模型。整个过程见图 4。

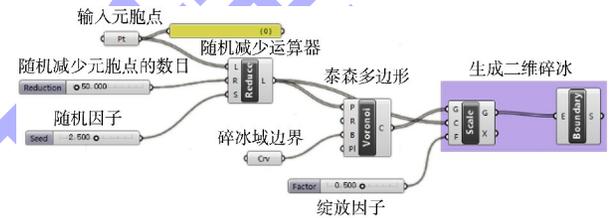


图 4 二维随机碎冰区域构建流程
Fig. 4 Flow for constructing a two-dimensional random fragmented ice area

1.1.3 优化碎冰模型

北极碎冰的尺寸可以用一个特定量统一表示, 即碎冰的等效直径(MCD 值)。这个理论是由 Renat Yulmetov 等提出的, 并可以使用下式进行计算:

$$D = l/\pi \tag{1}$$

式中: D 为碎冰的等效直径, m ; l 为二维碎冰周长, m 。

依据实际采集的极地碎冰数据, 进行等效直径的筛选, 以便使得碎冰分布的概率趋势更符合理论概率分布曲线。除了优化碎冰尺度之外, 还调整了其概率分布, 从而使得生成的碎冰在大小和间距方面展现出增强的随机性特质。同时, 还进行了厚度的优化, 以生成具有不同厚度范围的三维碎冰模型。

整个碎冰模型构建和优化的流程见图 5。

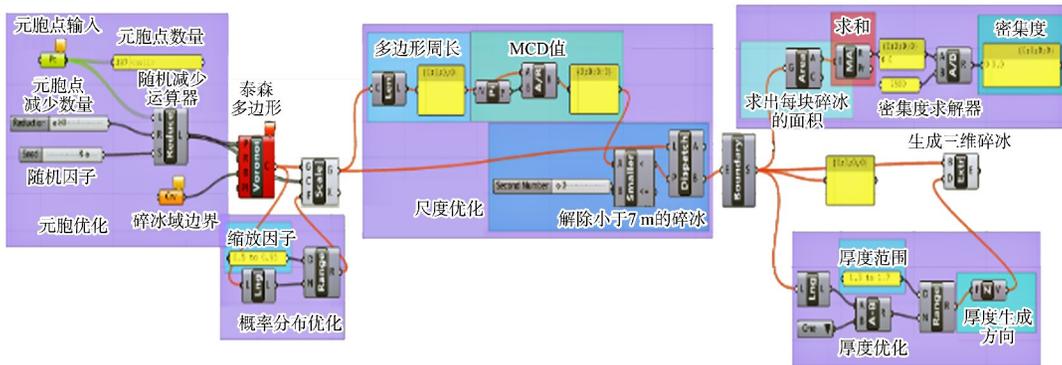


图 5 三维碎冰模型构建与优化流程

Fig. 5 Flow for construction and optimization of three-dimensional ice fragmentation model

最终根据上述流程构建真实极地碎冰模型，包括俯视图和主视图。通过元胞自动机构建的碎冰模型能够较好地模拟真实极地情形。根据软件构建的碎冰模型俯视和主视图见图 6。

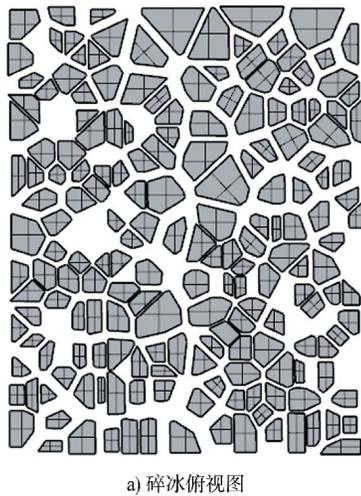


图 6 碎冰几何模型

Fig. 6 Geometric model of fragmented ice

鉴于极地区域碎冰的展布与泰森多边形高度相似，因此可以采用元胞自动机技术制作 Voronoi 图，以便构建精确的碎冰有限元模型。初始阶段运用 VB 脚本一步生成所有元胞点，并从这些生

产出的元胞点中挑选出一个尺寸为 120 m×80 m 的矩形范围，将其定为碎冰模型的生成区。

利用 Hypermesh 软件对碎冰模型以 0.3 m×0.3 m 的大小进行网格划分，结果见图 7，并将其生成 K 文件导入 LS-DYNA 中为后续船-冰碰撞做前处理准备。

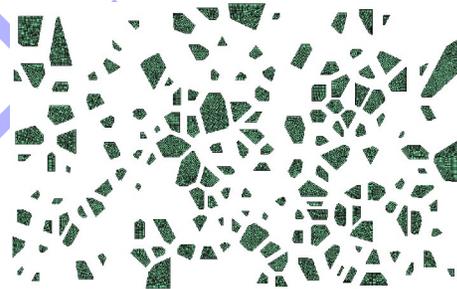


图 7 碎冰有限元模型

Fig. 7 Finite element model of fragmented ice

1.1.4 模型效果评价与应用情况

基于元胞自动机构建的碎冰模型在形态和尺寸分布上与实测极地碎冰具有较高相似性。通过泰森多边形划分与等效直径筛选，模型能较好反映碎冰的不规则形态及统计特征，提高了与实际数据的一致性。

在应用方面，该模型已被用于有限元仿真，如船-冰碰撞和冰荷载分析。相比规则几何建模，它更贴近真实情况，能为数值计算提供更可靠的边界条件。与此同时，利用 VB 脚本自动生成点集的方法效率较高，适合大规模参数化研究。

综上，该模型不仅在几何特征上接近真实碎冰分布，而且在工程仿真中具有良好的可行性，为极地船舶与结构物研究提供了有效的建模方法。

1.2 船-碎冰-水模型

为准确模拟船舶在碎冰区域航行过程中与碎冰的相互作用,该研究建立了船-碎冰-水多物理场耦合数值模型。该模型基于 S-ALE (Stochastic Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 算法构建,该算法兼具拉格朗日方法与欧拉方法的优点,能够有效处理流体大变形、多物质界面及流固耦合问题,适用于冰-水-船耦合系统中动态响应的数值模拟。

因需要整个碰撞舷侧区域通过碎冰区,根据资料^[10]可知,中型耙吸式挖泥船总长约 80 m,型宽约 18 m,舱容 5 000~15 000 m³,具有典型的肥大型船首和宽阔的作业甲板,其舷侧结构强度在冰区作业中具有代表性。该中型耙吸挖泥船施工时航速约为 1.0~3.0 m/s,针对中型耙吸式挖泥船舷侧结构强度分析,为节约计算时长航速选 2.0 m/s,计算时间设置为 80 s,将海冰概化为碎冰进行数值模拟计算。为模拟真实碎冰随洋流移动情形,额外赋予整片计算区域里所有海冰 Y 方向上 0.5 m/s 的初速度。基于船-碎冰-水耦合模型见图 8。

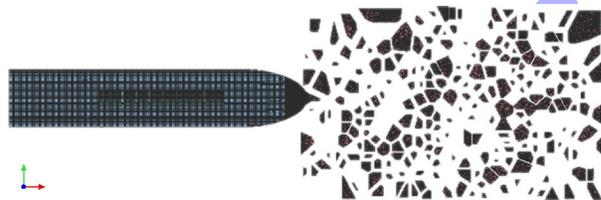


图 8 基于 S-ALE 下船-碎冰-水耦合模型
Fig. 8 Ship-fragmented ice-water coupling model based on S-ALE

其中碎冰分布由元胞自动机随机自动生成,选择其碎冰厚度为 0.6 m,分布区域为 120 m×80 m。

2 挖泥船船首结构增强优化分析

对于船首结构的增强优化方式,各国规范一般仅对船舶外板厚度、剖面模数与剪切面积作相应要求,而通过额外加装外部构件等改进措施的相关描述较少,因此在查阅相关外文资料与参考实船数据后,决定针对本文耙吸式挖泥船的船首外部进行局部增强优化,通过减少海冰与船首直接碰撞面积和避免直接接触入手,选择在船首处加焊冰犁进行局部强度的加强^[11]。

船首破冰冰犁是一种安装在耙吸挖泥船船首下方,专门设计用来破碎冰层的犁式刀刃状结构。当挖泥船航行或疏浚时,船首的冰犁会首先与冰层接触,由于船舶的巨大质量和动力,冰犁会将冰层压碎或切开,从而为船只开辟出一条航道。

国际上,俄罗斯船舶运用冰刀冰犁技术较为广泛,其加装的冰刀冰犁需要在船首的整个中纵剖面处全部加装,其适应的保护范围较广。但从实际碰撞范围来看,船舶在冰区航行时所遇海冰并不会与整船船首进行碰撞,所以本文从耙吸式挖泥船吃水方面入手,根据其在空载、满载(即最小吃水与最大吃水)情况下吃水均超过球鼻艏,因此判断其并不会在球鼻艏处与海冰发生碰撞,加装的冰犁并不需要贯穿整个船首的中纵剖面,只需选取满足挖泥船本身吃水范围那一段加装冰犁即可。这种冰犁结构有利于最大限度地减轻冰犁质量,减少对挖泥船有效装载量的消耗,这种冰犁安装位置图及特殊设计模型见图 9,冰犁结构尺寸见表 1。

冰犁加装范围选取上至船首平面,下至球鼻艏最上端,不仅优化了船首冰犁施工范围,并且由于此冰犁设计时贴合船首曲面,对挖泥船本身结构与稳性影响极小,加装时只需将冰犁模块提前制作完成,通过焊接的方式将其与船首、球鼻艏焊接连接即可。这种加装方式一方面可以加快施工速度,另一方面在面对不同冰级需求时,可采取焊接方式快速更换冰犁进行局部再加强,具有显著的便利性。

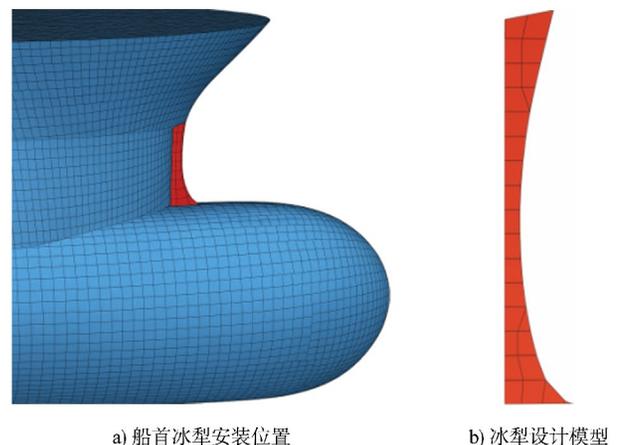


图 9 冰犁安装位置与具体模型
Fig. 9 Installation position and specific model of ice plow

表 1 冰犁结构尺寸
Tab. 1 Structural dimensions of ice plow

高度/ m	最大 宽度/m	初始厚度/ mm	模型 材料	作用 部位
2.6	0.7	20.00	EH36	船舶首部

3 计算结果分析

考虑海冰的分布皆存在随机性，本文采用元胞自动机来构建碎冰模型模拟实际情况进行计算。

3.1 加装冰犁对船首破冰优化数据的对比

冰级选取为 ICE3。目前针对冰犁的默认厚度选择 20 mm，材料选择常规冰级钢(EH36)为默认材料进行研究计算，EH36 钢屈服强度约 355 MPa。其中加装冰犁后的船首受力见图 10，船舶冰犁受力见图 11。安装 20 mm 厚冰犁的船首受力情况见表 2。

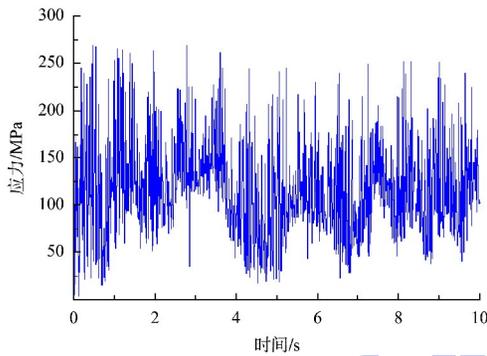


图 10 加装冰犁后船首受力
Fig. 10 Force on bow with ice plow

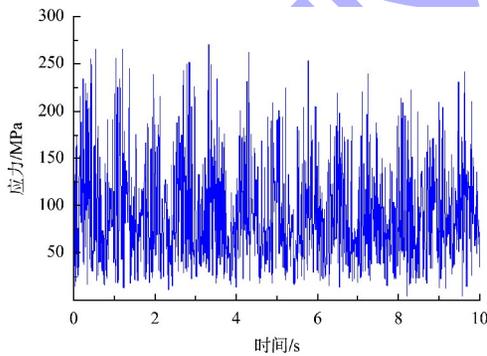


图 11 冰犁受力
Fig. 11 Force on ice plow

表 2 安装 20 mm 厚冰犁的船首受力情况

工况	应力平均值/MPa	应力最大值/MPa
未加冰犁	188	308
加装冰犁	117	269

本文所有研究工况均在挖泥船本身船体船首未遭受破坏情况下进行，从而便于记录碰撞过程中最精准的碰撞应力大小。

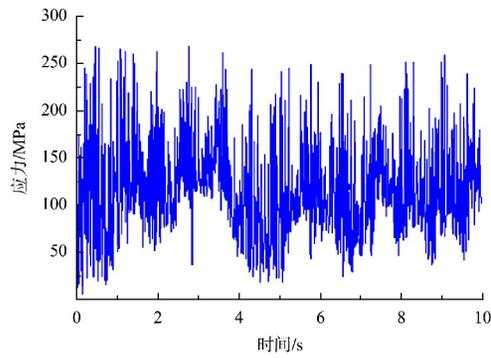
由图 10、11 与表 2 可知，加装冰犁后船首的应力显著降低。耙吸挖泥船船首通常采用普通钢材(如 Q235)，其屈服强度仅为 235 MPa。而在未加装冰犁情况下，原始船首在 ICE3 冰级下以 2.0 m/s 船速航行的最大碰撞应力可达 308 MPa，已远超材料的屈服强度，导致船体结构发生塑性变形或破坏。在加装厚度为 20 mm 的 EH36 钢制冰犁后，船首最大碰撞应力降至 269 MPa，平均碰撞应力也显著降至 117 MPa。尽管船首最大应力值仍高于 Q235 钢的屈服强度，但较原始状态已有大幅下降，而且冰犁结构也避免了船体与海冰的直接碰撞，有效分散和吸收了碰撞能量。若进一步增加冰犁的厚度，有望将最大碰撞应力控制在 235 MPa 以下，从而为船首提供更充分的保护。

3.2 不同冰犁厚度对船首破冰优化数据的对比

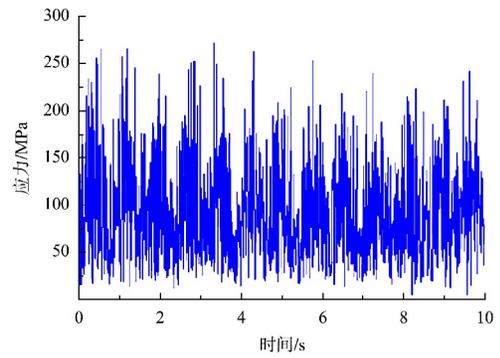
由表 2 可知，在挖泥船船首加装冰犁后，船首受到的碰撞应力明显减少，证明冰犁对船首具有保护效果。为进一步探究冰犁性能参数的改变是否可以增强其对挖泥船船首的保护效果，本节研究冰犁厚度改变是否对挖泥船船首起到更好的保护作用。

根据相关研究^[12]，在已有结构厚度不变的条件下，常用船首冰犁的加强厚度宜选择 20(本文选取冰犁的初始厚度)、30、40、50 mm，在此基础上进行模拟试验研究对比，根据不同厚度所得结果，分析选取最佳厚度进行优化。

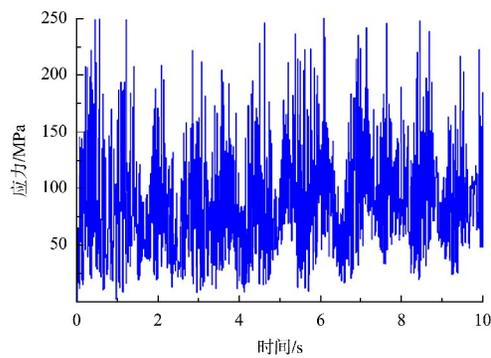
冰犁厚度变化时船舶船首应力见图 12，不同厚度下冰犁受力见图 13，加装不同厚度冰犁下船首受力值见表 3，不同厚度冰犁受力值见表 4。



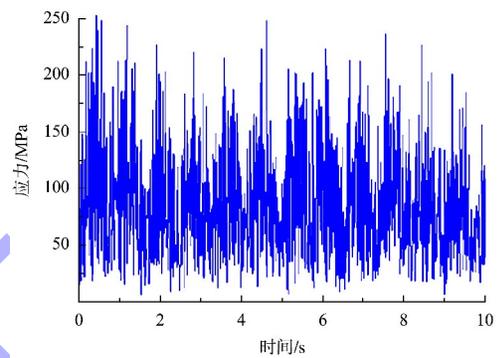
a) 冰犁厚度20 mm



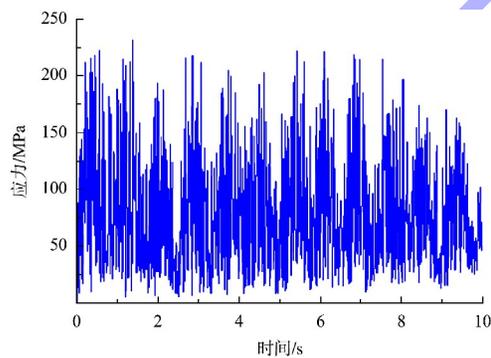
a) 冰犁厚度20 mm



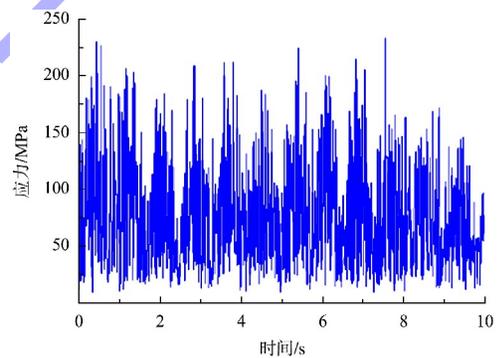
b) 冰犁厚度30 mm



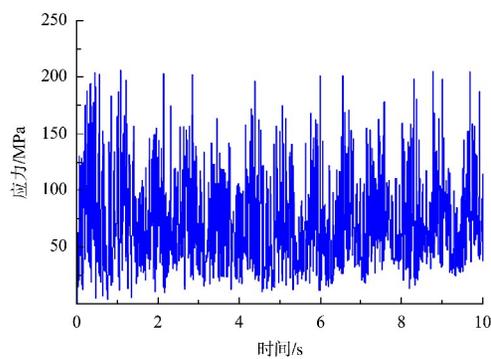
b) 冰犁厚度30 mm



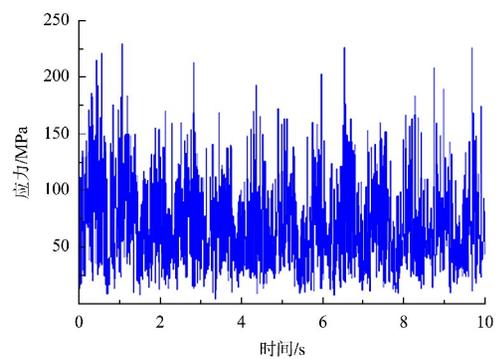
c) 冰犁厚度40 mm



c) 冰犁厚度40 mm



d) 冰犁厚度50 mm



d) 冰犁厚度50 mm

图 12 加装不同厚度冰犁下船首受力

Fig. 12 Force on bow with different ice plow thicknesses

图 13 不同厚度冰犁受力

Fig. 13 Force on ice plow with different thickness

表3 加装不同厚度冰犁的船首受力情况

Tab. 3 Force on bow with different ice plow thicknesses

工况	船首应力平均值/MPa	船首应力最大值/MPa
未加冰犁	188.0	308
冰犁厚度 20 mm	117.0	269
冰犁厚度 30 mm	86.0	250
冰犁厚度 40 mm	77.4	231
冰犁厚度 50 mm	72.1	206

表4 不同厚度冰犁受力情况

Tab. 4 Force on ice plows with different thicknesses

冰犁厚度/mm	冰犁应力平均值/MPa	冰犁应力最大值/MPa
20	91.0	271
30	83.0	253
40	75.7	234
50	69.6	228

由图 13 可知,不同厚度下冰犁对船首保护效果不同。冰犁越厚,船首受到的碰撞应力均值与峰值就越小,即证明越厚的冰犁对船首保护效果越好。

由表 3 可知,在船首未加装冰犁时,挖泥船在冰区航行施工过程中船首与海冰直接接触,碰撞直接作用于船首,导致整体应力偏大。但是在船首加装冰犁后,挖泥船船首不与海冰发生直接碰撞,而是将冰犁作为与海冰碰撞后传递应力的媒介,将力传递到船首上,这样就导致应力集中在冰犁上而非船首,从而大幅减少船首上的应力。

由图 13 与表 4 可知,由于直接接触海冰的关系,加装在船首的冰犁其峰值受力比船首受力大,但是随着本身构件厚度越厚,其受到的碰撞应力就越小。

由表 3 与表 4 可知,当船首冰犁厚度达到 40 mm 以上,此时船首最大碰撞应力降至 231 MPa 以下,低于 Q235 钢屈服强度 235 MPa,满足 ICE3 抗冰安全性要求,耙吸挖泥船能够满足冰级 ICE3 航行要求。

根据中国船级社《海船入级规范》及《冰区航行操作指南》^[13]的相关规定,ICE3 冰级航行要求为:适用轻冰区或季节性稀薄冰区,通常为冰厚 ≤ 10 cm 的薄冰、碎冰或浮冰环境,需具备相应的艏部加强结构及防冰推进装置(如冰犁),并且船舶在航行过

程中最大碰撞应力应小于船首材料的屈服应力等。

综上所述,船首处加装的冰犁越厚,其对挖泥船船首与自身保护效果越好,但是越厚的冰犁其质量越大,对船首的影响也越大。根据试验数据和中国船级社《海船入级规范》及《冰区航行操作指南》的相关规定,冰犁厚度选取约 50 mm 最佳,超过 50 mm 会对船舶造成影响,低于 50 mm 的加装船就不满足在 ICE3 冰区下航行的条件。综合上述数据与已有研究成果,保持碰撞应力大小在许可范围内且不影响全船的情况下,挖泥船选择冰犁厚度 50 mm 为最优方案。

3.3 加装冰犁后碎冰区域航行船首优化数据的对比

挖泥船在碎冰区域航行时,船舶船首舷侧受力较大,当超过钢材本身应力时,将对船体造成损坏。

通过数值仿真模拟进行对比(材料选择为 Q235,厚度为 50 mm),基于加装一种冰犁下与原构件船首舷侧应力对比见图 14。

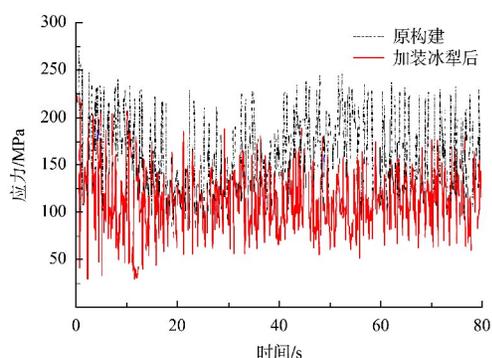


图 14 冰犁对舷侧应力影响

Fig. 14 Influence on side stress with ice plow

表5 有无冰犁舷侧受力情况

Tab. 5 Forces on side of ship with or without ice plow

工况	应力平均值/ MPa	应力最大值/ MPa	最大塑性变形/ mm
原构件舷侧	146	271	2.77
加装冰犁舷侧	102	228	0

由图 14 与表 5 可知,在加装冰犁后,耙吸挖泥船在碎冰区航行时船首舷侧受力大小明显比不加冰犁时小,尤其体现在峰值应力大小上。并且加装冰犁后,船舶舷侧受力最大值只有 228 MPa,

满足其 Q235 钢的许用应力的尺寸, 所以认为在此航行工况下并不会对挖泥船本身造成不可逆的塑性变形。

4 结论

1) 加装冰犁后船首区域的最大碰撞应力由 308 MPa 降低至 206 MPa, 应力峰值下降约 33.1%; 有效缓解了局部应力集中问题, 显著提升了船体抗冰安全裕度。

2) 冰犁厚度对抗冰性能影响显著, 存在最优范围。冰犁厚度达到 40 mm 以上时, 最大应力降至 231 MPa 以下, 满足 CCS ICE3 冰级 (冰厚 ≤ 0.10 m) 航行要求; 50 mm 时抗冰效果最佳。

3) 提出的局部加装式冰犁结构仅覆盖吃水带范围即可满足防护需求, 相比全艏布置可显著减轻附加质量, 对船舶稳性影响较小, 兼具经济性与可实施性。

参考文献:

- [1] LUBBAD R, LØSET S. A numerical model for real-time simulation of ship-ice interaction[J]. Cold regions science and technology, 2011, 65(2): 111-127.
- [2] JORDAAN I J. Mechanics of ice-structure interaction[J]. Engineering fracture mechanics, 2001, 68(17/18): 1923-1960.
- [3] Daley C G. Ship structures in ice: Fundamental principles and applications[J]. Ocean engineering, 2019, 186: 106078.
- [4] JENSSEN R, SANDERSON T J. Advances in modeling ice impact on ship hulls[J]. Marine structures, 2018, 61: 120-134.
- [5] 刘东, 杨征, 李辉. 极地船冰载荷简化计算方法研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(19): 27-31.
LIU D, YANG Z, LI H. A simplified method for calculating the ice load of polar ships [J]. Ship science and technology, 2019, 41(19): 27-31.
- [6] 徐张, 李锐, 丁琦. 不同类型层冰载荷作用下船首结构响应研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(19): 10-15.
XU Z, LI R, DING Q. Research on bow structure response under different ice loads [J]. Ship science and technology, 2021, 43(19): 10-15.
- [7] 钢质海船入级规范[S]. 北京: 中国船级社出版社, 2021. Rules for classification of sea-going steel ships [S]. Beijing: China Classification Society Press, 2021.
- [8] 王蓓怡. 考虑碎冰和层冰作用的船舶累积损伤及运动响应研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
WANG B Y. Research on cumulative damage and motion response of ships considering the effect of crushed ice and layer ice[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.
- [9] 张健, 王蓓怡, 李兰岚. 基于元胞机技术的碎冰模型构建优化方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(20): 1-6.
ZHANG J, WANG B Y, LI L L. An optimization method for building a broken ice model based on cellular machine technology [J]. Ship science and technology, 2022, 44(20): 1-6.
- [10] XUE Y Z, LIU R W, LI Z, et al. A review for numerical simulation methods of ship-ice interaction [J]. Ocean engineering, 2020, 215: 107853.
- [11] 刘少康, 李中扬, 樊红元, 等. 船艏冰刀对船冰碰撞时结构动力响应影响分析[J]. 船海工程, 2023, 52(1): 41-45.
LIU S K, LI Z Y, FAN H Y, et al. Analysis on the influence of bow ice knife upon structural dynamic response under ship-ice collision [J]. Ship & ocean engineering, 2023, 52(1): 41-45.
- [12] 朱荣荣, 周骏. 船用系泊设备结构加强形式改进[J]. 船海工程, 2022, 51(3): 47-50, 55.
ZHU R R, ZHOU J. Structural optimization of reinforcements for mooring equipment [J]. Ship & ocean engineering, 2022, 51(3): 47-50, 55.
- [13] 冰区航行操作指南[S]. 北京: 中国船级社出版社, 2021. Guidelines for ice navigation [S]. Beijing: China Classification Society Press, 2021.